

УДК 004.032.26

Г. І. Шараєвський, асистент,**С. І. Шаповалова**, канд. техн. наукНаціональний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут», м. Київ**МОДЕЛЬ АВТОМАТИЧНОЇ АДАПТАЦІЇ ДІАГНОСТИЧНОЇ
НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ СТРУКТУРИ ДО РОЗПІЗНАВАННЯ
ВИПАДКОВИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА УМОВ АПРІОРНОЇ
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ МНОЖИНИ КЛАСІВ**

В роботі запропоновано підхід до навчання та автоматичної адаптації діагностичної нейромережової структури в умовах апріорної невизначеності множини класів, що підлягають розпізнаванню. Цей підхід реалізовано на основі визначення моменту розладки випадкового часового ряду із використанням авторегресійної моделі.

Ключові слова: *розпізнавання, штучні нейронні мережі, діагностика, теплофізичні процеси, ядерні реактори, випадкові часові ряди, розладка стохастичного процесу, модель авторегресії.*

Постановка проблеми. Ядерні енергоблоки сучасних АЕС, особливо їх реакторні установки є об'єктами підвищеної екологічної небезпеки. Це пов'язане, у першу чергу, з потенційною загрозою виникнення аварійних режимів експлуатації в активних зонах енергетичних ядерних реакторів [1]. Підкреслюючи при цьому визначальний вплив характеру теплофізичних процесів, які протікають у сучасних водоохолоджуючих реакторних установках, на безпеку ядерних енергоблоків, необхідно відзначити наступні інформаційні аспекти забезпечення експлуатаційної надійності сучасних АЕС. Так, насамперед, енергетичні реактори, зокрема, некіплячі, типу ВВЕР, відзначаються надзвичайно високою теплонапруженістю поверхні тепловіддачі тепловідляючих елементів (ТВЕЛ), які містять ядерне паливо. Саме цей компонент активної зони є критично важливим для безпеки АЕС. Раннє виявлення та автоматичне розпізнавання передаварійних теплофізичних процесів, зокрема, режиму кипіння теплоносія на поверхні ТВЕЛ, не може бути забезпечено сучасними комп'ютерними засобами моніторингу та діагностики активних зон [2]. Таким чином, розробка нового покоління програмно-технічних засобів оперативної діагностики, які здатні забезпечити надійне автоматичне розпізнавання аномальних теплофізичних процесів на поверхні ТВЕЛ в про-

цесі експлуатації реакторів ВВЕР є, за оцінками фахівців [3], актуальною науковою проблемою.

Аналіз останніх досліджень, що були виконані за останні роки [4], дозволили з'ясувати основні діагностичні параметри та їх характеристики, зокрема, спектральні, які містять важливу діагностичну інформацію про перебіг теплофізичних процесів в активних зонах реакторів ВВЕР. Зазначені процеси, що реалізуються на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ, в ряді випадків мають аномальний характер, який здатний ініціювати аварійні режими теплозйому та руйнацію ТВЕЛ. Таким чином, ці аномальні теплофізичні процеси, насамперед, кипіння теплоносія в активній зоні ядерного реактора являють собою безпосередню загрозу безпеці ядерного енергоблоку. Нещодавно, зокрема, в роботах [3, 4] було розроблено математичні підходи до вирішення задачі виявлення початку кипіння теплоносія за параметрами флуктуацій нейтронного потоку в активній зоні реактора ВВЕР. Проте, ці підходи є фактично детермінованими, що принципово не дає змоги забезпечити на основі їх використання надійну ідентифікацію ймовірного за своєю фізичною природою процесу генерації парової фази. Втім, слід зазначити, що висока надійність правильної ідентифікації цього аномального теплофізичного процесу на поверхні ТВЕЛ із використанням відомих базових статистичних, геометричних, структурних концепцій розпізнавання [5] також не може бути досягнута. Однією із причин цих обмежень є фактична неможливість одержання значних обсягів апіорних навчальних даних про класи об'єктів, які підлягають розпізнаванню, для практичної реалізації кожної із зазначених моделей. Разом з тим, практична реалізація нейромережових підходів до ідентифікації складних діагностичних об'єктів, що була запропонована авторами в роботі [6, 7] підтвердила високу надійність та ефективність ряду топологій штучних нейронних мереж (ШНМ). Втім, ряд принципових аспектів адаптації ШНМ до реального діагностичного середовища в умовах апіорної невизначеності множини класів, що підлягають розпізнаванню, на сьогоднішній день є ще не вирішеними. В особливій мірі це стосується ідентифікації складних випадкових об'єктів діагностики (зокрема, спектральних реалізацій стохастичних діагностичних сигналів відповідно до нештатних режимів теплозйому з поверхні ТВЕЛ в реакторі ВВЕР), які розглядаються в даній публікації.

Мета даної статті полягає в розробці математичної моделі для практичної реалізації навчання й адаптації ШНМ в умовах апіорної невизначеності множини класів, які підлягають розпізнаванню цією нейрокомп'ютерною діагностичною структурою. Зазначений підхід

передбачає використання математичних моделей стохастичних динамічних систем. Ці моделі забезпечують автоматичне виявлення у реальному часі факту зміни статистичних властивостей випадкового часового ряду, що аналізується в ознакових спектральних каналах діагностичного сигналу і є пов'язаним з виникненням початку кипіння на поверхні ТВЕЛ в реакторі ВВЕР.

Постановка задачі про розпізнавання випадкового об'єкта в умовах апіорної невизначеності множини класів, що підлягають розпізнаванню, математично формалізується наступним чином. Відповідно до зазначених вище умов апіорної невизначеності відомою є наступна діагностична інформація:

- вихідні навчальні статистичні вибірки, що стосуються штатного (конвективна тепловіддача) режиму теплозйому;
- множина спектральних ознак, в яких зміна статистичних властивостей багатомірного діагностичного вектора, який відповідає спектру відповідного шумового сигналу з активної зони ядерного реактора, характеризує момент міжкласового переходу від штатного режиму тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ до аномального теплофізичного процесу початку кипіння.

Слід зазначити, що перелічені вище обмеження стосовно наявності вихідної апіорної інформації про класи діагностичних об'єктів суттєво відрізняються від звичайно ідеалізованих у відомих роботах [4] умов розпізнавання випадкових діагностичних об'єктів. Ці ідеалізовані умови відзначаються наявністю попередньо відомих експерту з навчання діагностичної системи усіх без винятку елементів навчальної вибірки множини класів $A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$, що підлягають розпізнаванню. В реальних умовах експлуатації АЕС вищезазначена апіорна інформація про класи діагностичних об'єктів практично відсутня. Таким чином, математичне обґрунтування запропонованої в даній роботі моделі автоматичного визначення моментів міжкласових переходів в процесі динамічної зміни режимів теплозйому з поверхні ТВЕЛ в умовах збільшення теплової потужності активної зони реактора ВВЕР полягає в наступному.

Як відомо [8], часовий ряд $\{X_1^N\}$, $N \rightarrow \infty$ є стаціонарною випадковою послідовністю (її стаціонарність характеризує притаманна головна властивість, що відповідає незмінності статистичних моментів другого порядку), яка представлена відповідною траєкторією цієї послідовності. У деякий момент часу t_0 ця траєкторія стрибком змінює свої статистичні властивості, що рівнозначно визначаються відповідним вектором параметрів θ , $\dim\{\theta\} = r$. Це означає, що до моменту $(t_0 - 1)$

включно вектор параметрів становив $\theta = \theta_2$, а починаючи з моменту t_0 цей вектор складає $\theta = \theta_1$. Спостерігаючи $\{X_1^N\}$, $N \rightarrow \infty$ треба визначити момент t_0 зміни статистичних властивостей цього часового ряду, тобто момент його розладки. Принциповим є той факт, що при послідовному виявленні цього моменту в часовому ряді $\{X_1^N\}$, $N \rightarrow \infty$ визначення t_0 має відбуватися в темпі, що є відповідним до виникнення наступної точки X^N цього випадкового процесу. Визначення моменту розладки t_0 має бути забезпечено в режимі реального часу. Існують такі відомі підходи до визначення моменту розладки випадкового стаціонарного процесу. Відповідно до [9,10] алгоритм кумулятивних сум (АКС), запропонований Пейждем (E.Page), використовує послідовний критерій відношення ймовірностей (ПКВЙ), що був розроблений Вальдом (A.Wald). Відповідно до АКС: для гіпотези H_1 , за відсутності розладки, параметр $\theta = \theta_1$; з іншого боку, за умови, коли виникає розладка діє гіпотеза H_2 , якій відповідає $\theta = \theta_2$. При цьому параметр θ є параметром щільності ймовірностей $\omega(x_t | \theta)$ розподілу значень часового ряду $\{X_1^N\}$, $N \rightarrow \infty$. При цьому кумулятивна сума (КС) цього ряду визначається наступним чином

$$S_t = S_{t-1} + \ln \left[\frac{\omega(x_t | \theta_2)}{\omega(x_t | \theta_1)} \right]. \quad (1)$$

Якщо на момент часу t ця сума відповідає $S_t \geq h_1$, то має місце гіпотеза H_2 . Навпаки, якщо в момент часу t , ця сума $S_t \leq -\varepsilon$, то приймається гіпотеза H_1 , коли ж $-\varepsilon < S_t < h$, то виконується наступний крок АКС, що відповідає моменту $(t+1)$. В умовах, коли на кроці $(t-1)$ вже прийнята гіпотеза H_1 , КС обнуляється, тобто $S_t^k = 0$ ($k = 0$).

Таким чином, якщо t_0 є моментом зміни гіпотез з H_1 на H_2 , то має місце наступне математичне очікування:

$$E \left[\ln \frac{\omega(x_t | \theta_2)}{\omega(x_t | \theta_1)} \right] > 0.$$

Якщо, відповідно до А.Н. Ширяєва та Лордена (G. Lorden), прийняти $\varepsilon = 0$, то АКС з (1) приймає наступний вигляд:

$$g_t = (g_{t-1} + \Delta g_t)^+, \quad \Delta g_t = \ln \frac{\omega(x_t | \theta_2)}{\omega(x_t | \theta_1)},$$

де $(x)^+ = \max(0, x)$; $g_0 = 0$.

При цьому момент визначення факту розладки подібно до (1) має вигляд:

$$t_a = \inf\{t \geq 1 : g_t \geq h\}. \quad (2)$$

Вищезазначені особливості алгоритму АКС на основі ПКВЙ зображено на рис 1.

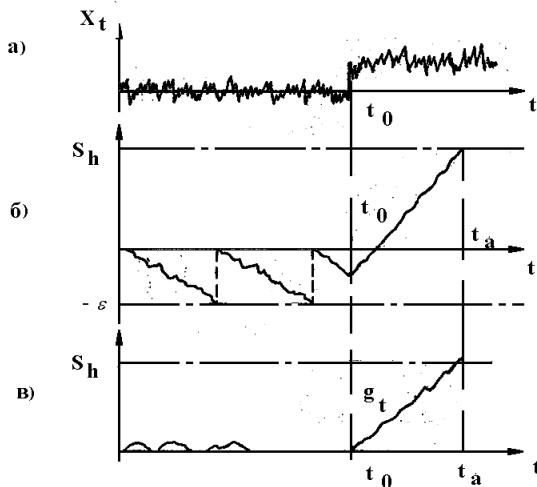


Рис. 1. Визначення моменту зміни статистичних властивостей часового ряду на основі використання АКС: а) розладка стаціонарного випадкового процесу в момент часу t_0 ; б) реалізація АКС (E.Page) з використанням ПКВЙ в) реалізація підходу А.Н.Ширяєва та G.Lorden до визначення АКС на основі обчислення статистики g_t з відбиваючим екраном.

Відомі методи визначення розладки практично не можуть бути застосовані для вирішення сформульованих вище діагностичних задач, що полягають у виявленні в режимі on-line стану формування нового технічного стану об'єкту діагностики (в першу чергу, початкових фаз формування аномальних режимів експлуатації) на основі аналізу послідовностей значень спектральної повноти у визначальних, тобто породжуючих, ознаках відповідного діагностичного вектора. Зазначена невідповідність існуючих методів АКС із використанням ПКВЙ та інших визначальних функцій зумовлені наступними об'єктивними чинниками:

- Інформація стосовно статистичного параметра $\theta = \theta_2$ при $t > t_0$ фактично відсутня через неможливість визначення цього параметра в умовах розвитку передаварійної ситуації на АЕС.

- В реальних умовах виникнення аварійної ситуації, тобто переходу до нового технічного стану критично важливих для безпеки елементів та систем активної зони, досліджуваний числовий ряд $\{X_1^N\}$, $N \rightarrow \infty$ не є стаціонарним
- Часовий ряд $\{X_1^N\}$ апіорно не може вважатися незалежною послідовністю без попереднього визначення його статистичних властивостей.

Моделі розладки випадкового процесу

Із урахуванням вищезазначених обмежень існуючі підходи до обчислення АКС мають бути суттєво розвинені на основі іншої концепції визначення стану розладки статистичних послідовностей із використанням математичних моделей авторегресії (АР). Далі на основі розглянутого вище теоретичного підходу до визначення моменту зміни статистичних властивостей часового ряду в даній роботі розглянуто наступні математичні моделі до виявлення стану розладки випадкового процесу $\{X_1^N\}$ з урахуванням характерних умов отримання апіорної інформації:

Перша модель. Якщо до інтервалу часу $t \leq t_0 - 1$ (момент t_0 є невідомим) сумісна щільність розподілу ймовірностей $\omega(X_1^{t_0-1} | \vec{\theta}) = f(\vec{\theta} : \vec{\theta} \in \vec{\theta}_1)$ (де: $\vec{\theta}_1$ — область параметричного простору з розмірністю $\dim \vec{\theta} = r$), залежить від вектора параметрів $\vec{\theta}$, то має місце наступна гіпотеза стосовно статистичних властивостей часової послідовності $\{X_1^N\}$ на цьому інтервалі часу.

$$H_0 : \vec{\theta} \in \vec{\theta}_1. \quad (3)$$

При зміні статистичних властивостей часового ряду умовна сумісна щільність розподілу ймовірностей його значень змінюється і становить

$$\omega(X_{t_0}^N | X_{t_0}^{t_0-1}, \vec{\theta}) = f(\vec{\theta} : \vec{\theta} \in \vec{\theta}_2)$$

В цих умовах при зміні статистичних властивостей часового ряду приймається гіпотеза

$$H_1 : \vec{\theta} \in \vec{\theta}_2, \dim \vec{\theta} = r. \quad (4)$$

Відповідно до цієї моделі, інформація стосовно параметрів $\vec{\theta}_1$ і $\vec{\theta}_2$ відповідних розподілів ймовірностей має бути повною. Проте, за умови раптового виникнення нештатного експлуатаційного режиму обладнання АЕС, що діагностується, інформація стосовно вектора

параметрів $\vec{\theta}_2$ є невідомою. З цієї причини розгляду підлягає наступна, друга, модель розладки та підходи до задання інформації про вектор параметрів $\vec{\theta}$.

Друга модель. Відповідно до цієї моделі в моменти часу $t \leq t_0 - 1$, що передують виникненню розладки має місце наступна щільність розподілу ймовірностей $\omega(X_1^{t_0-1} | \vec{\theta}) = f(\vec{\theta} : \vec{\theta} \in \vec{\theta}_1)$, яка відповідає гіпотезі $H_0 : \theta \in \vec{\theta}_1$.

При $t > t_0$ має місце зміна статистичних властивостей часового ряду $\{X_{t_0}^N\}$, з іншою сумісною щільністю розподілу $\omega(X_{t_0}^N | \vec{\theta})$ де $\vec{\theta} = \vec{\theta}_2$. Можливим є наступний підхід до завдання апіорної інформації про вектор параметрів $\vec{\theta}$:

Цей вектор може бути описаний рівнянням

$$\vec{\theta} = \vec{\theta}_0 + \lambda \vec{c}, \quad (5)$$

де: $\vec{\theta}_0$ — попередньо встановлена межа у прості параметрів;

\vec{c} — одиничний вектор $\|\vec{c}\| = 1$ напрямку у просторі $\vec{\theta}$ з розмірністю $\dim \vec{c} = r$.

При цьому, вирішуючи правило стосовно факту зміни часового ряду при виникненні розладки, визначається момент переходу “межі” $\vec{\theta}_0$ в напрямку одиничного вектору \vec{c} . Іншими словами, до розладки ($t \leq t_0 - 1$), має місце гіпотеза H_0 якій відповідає параметр $\lambda \leq 0$, а після розладки $t > t_0$ приймається гіпотеза H_1 , якій відповідає $\lambda > 0$. Зазначена модель адекватно характеризує факт збільшення інтенсивності спектральної повноти в деякій інформаційно значущій спектральній ознаці в умовах виникнення аномального експлуатаційного стану ТВЕЛ в ядерному реакторі. При цьому факт збільшення спектральної інтенсивності відповідної частотної ознаки в спектрі сигналу є фізично доведеним, як це випливає з даних ряду робіт [4—7].

Висновки

Визначення фізичної межі між двома класами режимів теплозйому, а саме: конвективною тепловіддачею (відомий клас A1) та початку кипіння теплоносія (невідомий клас A2, інформація про який у експерта з навчання є відсутньою), — в даній роботі практично реалізоване на основі розглянутої вище другої математичної моделі визначення моменту розладки випадкового часового ряду. Цей ряд утворено відповідною послідовністю рівнів спектральної повноти в спект-

рах діагностичного сигналу нейтронного шуму при збільшенні теплової потужності реакторного каналу. Попередні дослідження зазначених випадкових часових рядів, виконані авторами даної роботи, довели можливість їх ефективної апроксимації послідовностями авторегресійного типу. З огляду на це w_1, w_2, \dots, w_N є проінтегрованою послідовністю авторегресії (АР), тобто:

$$\nabla^d W_t = x_t, \quad \nabla^1 W_t - W_{t-1}, \quad x_t = \sum_{i=1}^p \Phi_i x_{t-i} + \varepsilon_t, \quad (6)$$

де ∇^d — оператор різниці, d — порядок різниці, p — порядок авторегресії, Φ_1, \dots, Φ_p — коефіцієнти авторегресії, ε_t — незалежна гаусівська послідовність.

Аналіз послідовностей рівнів спектральної повноти в інформаційно значущих ознаках нейтронного шуму показав, що міжкласовий перехід супроводжується суттєвою зміною $(p+1)$ -мірного вектора параметрів моделі (6) тобто $\theta^T = (\Phi_1, \dots, \Phi_p, \sigma_\varepsilon)$. Формально, виявлення факту зміни цього вектора параметрів моделі АР, а саме: коефіцієнтів авторегресії Φ_1, \dots, Φ_p — дає змогу вирішити задачу виявлення початку міжкласового переходу, як це показано на наступній ілюстрації.

Вищезазначені результати пошуку розладки в інформаційно значущому спектральному каналі нейтронного шуму в активній зоні реактора ВВЕР в момент міжкласового переходу від класу А1 до класу А2 представлено на рис. 2.

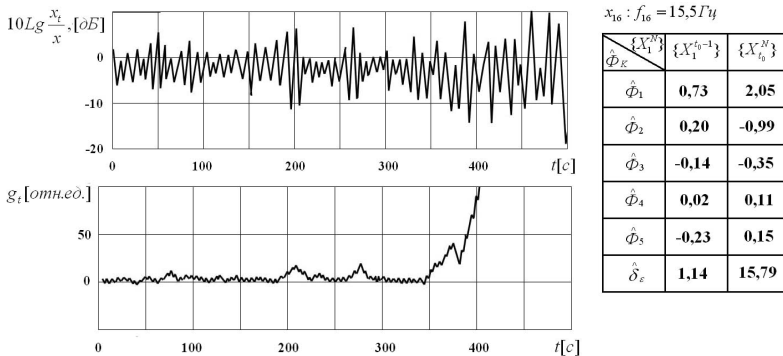


Рис. 2. Результати практичної реалізації алгоритму визначення моменту між класового переходу на основі АР моделі за умови апіорної невизначеності одного із суміжних класів.

Вирішення задачі адаптації діагностичних нейромережевих структур до конкретного об'єкта діагностики в умовах апіорної невизначеності множини класів, що підлягають розпізнаванню, може бути ефективно реалізовано на основі визначення моменту розладки випадкового часового ряду із використанням авторегресійної моделі.

Список використаних джерел:

1. Самойлов О.Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О.Б. Самойлов, Г.Б. Усынин, А.М. Бахметьев. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 279 с.
2. Анохин А.Н. Системы поддержки оператора АЭС / А.Н. Анохин, В.А. Острейковский, Н.Л. Сальников. — Обнинск : Институт атомной энергетики, 1988. — 92 с.
3. Kratzsch A. Anwendung von Kunstlichen Neuronalen Netzen (Multilayer Perzeptron) in der Reaktorsicherheitsforschung / A. Kratzsch, W. Kastner, R. Hampel, H. Ohlmeyer. — awt 52. Jg. (2007) Heft 10, S. 646—647.
4. Диагностирование неисправностей в ЯЭУ с помощью ИВС. Реферативный обзор отечественной и зарубежной литературы. — М. : ВНТИ Центр, 1987. — 178 с.
5. Шаповалова С.И. Диагностика подшипниковых узлов парового турбоагрегата АЭС при помощи нейронной сети / С.И. Шаповалова, Г.И. Шараевский // V международная конференция "Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2005", 17—20 мая 2005 г. : сб. тр. под редакцией Т.А. Таран. — К. : Просвіта, 2005. — С. 296—301.
6. Шаповалова С.И. Предобработка диагностируемого сигнала для распознавания нейронной сетью / С.И. Шаповалова, Г.И. Шараевский // VII международная конференция "Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2007", 15—18 мая 2007 г. : сб. тр. / ред. кол. : С.В.Сирота (гл. ред.) и др. — К. : Просвіта, 2007, С. 352—357.
7. Жигалевский А.А. Обнаружение разладки случайных процессов в задачах радиотехники / А.А. Жигалевский, А.Е. Красковский. — Л. : Изд. Ленингр. ун-та, 1988. — 224 с.
8. Булинский А.В. Теория случайных процессов / А.В. Булинский, А.Н. Ширяев. — М. : Физматлит, 2005. — 408 с.

In this work the approach for training and automated adaptation of diagnostic in conditions of a priori uncertainty of many classes to be recognized is proposed. This approach is implemented on the basis of determination of the moment of disorder of random time series using the autoregressive model.

Key words: *Recognition, artificial neural networks, diagnosis, thermal processes, nuclear reactors, random time series, disorder of random time series, autoregressive model.*

Отримано: 24.11.2009